

УДК 621.771.016.2-419.5.669.14:669.71:620.17

**С. В. Кутенева<sup>1\*</sup>, С. В. Гладковский<sup>1</sup>, С. Н. Сергеев<sup>2</sup>**<sup>1</sup> Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург<sup>2</sup> Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, г. Уфа

\*esv@imach.uran.ru

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССАМИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТАХ, ПОЛУЧЕННЫХ ДЕФОРМАЦИОННЫМИ И ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

В работе описаны способы управления процессами структурообразования в разнородных составляющих слоистых стальных, сталеалюминиевых и медно-стальных композитов, получаемых методами пакетной прокатки и сварки взрывом, а также с применением дополнительных деформационно-термических обработок.

*Ключевые слова:* микроструктура, слоистый металлический композит, пакетная прокатка, сварка взрывом, механические свойства

**S. V. Kuteneva, S. V. Gladkovsky, S. N. Sergeev**

## MANAGE OF STRUCTURE FORMATION PROCESSES IN LAYERED COMPOSITES PRODUCED BY DEFORMATIONAL AND HIGH-ENERGY METHODS

The paper describes methods for controlling the structure formation processes in the heterogeneous components of layered copper/steel, steel/aluminum and steel/steel composites produced by pack rolling and explosion welding and followed by additional deformational and thermal treatments.

*Key words:* microstructure, layered metal composite, pack rolling, explosion welding, mechanical properties

**А**ктуальной задачей материаловедения является изучение процессов структурообразования, протекающих в разнородных слоях слоистых композиционных материалов на основе сталей и сплавов, полученных высокопроизводительными способами в условиях воз-

действия высоких деформаций и температур. Понимание процессов структурных и фазовых превращений в слоях составляющих слоистых композитов позволяет прогнозировать и управлять его механическими свойствами не только на этапе выбора материалов компонент композита, но также путем определения их исходного состояния, технологии и оптимального режима получения слоистого материала, а также последующей деформационно-термической обработки.

С использованием сканирующей (метод EBSD-анализа, микрорентгеноспектральный анализ) и просвечивающей электронной микроскопии изучены микроструктуры составляющих композитов в исходном состоянии, а также в составе слоистых медносталльных (3 слоя), сталесплавных (7–27 слоев) и стальных (5–7 слоев) композитов, полученных методами пакетной прокатки и сварки взрывом.

По данным EBSD-анализа медносталльного композита «М1-сталь 20», полученного сваркой взрывом, было установлено, что под действием взрывной волны в медных слоях, находящихся в исходном отожженном состоянии, инициируется процесс динамической полигонизации с формированием новых субзеренных границ с малоугловой разориентировкой [1]. При этом средний размер зерна меди остается неизменным. В стальном слое, находящемся в момент сборки пакета в исходном горячекатаном состоянии, динамическое воздействие взрывом способствует дальнейшей эволюции субзеренной структуры, сформированной при горячей прокатке листа стали 20, и фрагментации исходных деформированных зерен с возникновением новых мелких зерен с высокоугловой разориентировкой. Дальнейшая холодная прокатка композита с обжатием 50 % способствует диспергированию зеренной структуры в обоих компонентах композита и повышению прочностных свойств от  $\sigma_{0,2} = 385$  МПа,  $\sigma_B = 440$  МПа до  $\sigma_{0,2} = 500$  МПа,  $\sigma_B = 530$  МПа.

На примере сталесплавных композитов на основе сверх- и низкоуглеродистых сталей 006/IF, 09 Г2 С, алюминия АД0 и его сплава АМц, полученных методом горячей (для алюминиевых слоев) и теплой (для стальных слоев) пакетной прокатки, показано, что выбранный температурный интервал 520–600 °С с обжатием 45–70 % способствует в стальных слоях диспергированию зерен феррита в 1,5–10 раз и формированию высокоразвитой субструктуры, что обеспечивает повышение прочностных свойств до уровня  $\sigma_{0,2} = 495...670$  МПа,  $\sigma_B = 520...725$  МПа.

По результатам структурных исследований стальных композитов «09Г2С-ЭП678», полученных сваркой взрывом, было установлено, что данный высокоэнергетический метод обеспечивает формирование прочных межслойных границ, характеризующихся резким концентрационным переходом между слоями и наличием в околосшовной зоне слоя 09Г2С мелкозернистой рекристаллизованной структуры (1–2 мкм) и крупнозернистой структуры (10–12 мкм) в центральной его части (рис., *а*). Использование в составе слоистого пакета исходных заготовок ультрамелкозернистой стали ЭП678 (03Х11Н10М2Т) со средним размером структурных элементов 50–200 нм позволяет получить более высокие прочностные свойства слоистого композита ( $\sigma_{0,2} = 770$  МПа,  $\sigma_B = 880$  МПа) в сравнении с применением обычной крупнозернистой стали ЭП678 ( $\sigma_{0,2} = 710$  МПа,  $\sigma_B = 750$  МПа). Вместе с тем формирование тонкого диспергированного слоя на границе раздела в ультрамелкозернистой стали ЭП678, подобного слою в стали 09Г2С, не наблюдается (рис., *б*).

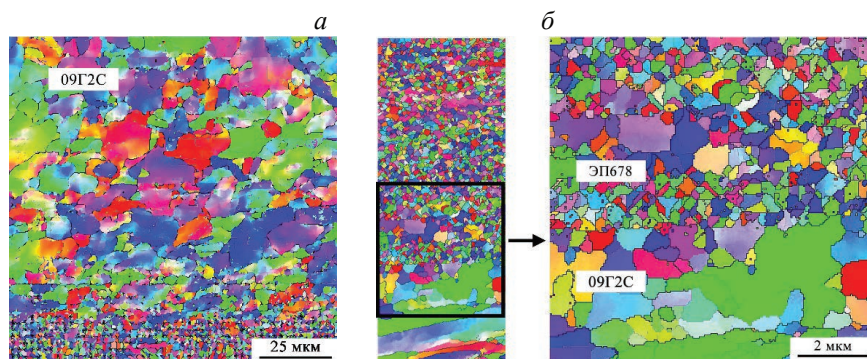


Рис. EBSD-карты разориентировок слоистого композита «09Г2С-ЭП678»: *а* — в околосшовной зоне слоя стали 09Г2С, *б* — на границе слоев 09Г2С и ЭП678

Последующая термическая обработка композита «ЭП678–09Г2С» при температуре 500 °С в течение 3 часов является режимом старения для стали ЭП678, в процессе которого идет дисперсионное упрочнение за счет выделения дисперсных интерметаллидов, и режимом высокого отпуска для стали 09Г2С, вызывающее ее разупрочнение путем снятия внутренних напряжений и перераспределения углерода. Несмотря на то, что доля высокопрочной стали ЭП678 в композите составляет не более 25 %, эффект дисперсионного упрочнения этих

слоев обеспечивает повышение механических свойств всего композита, но только в случае использования закаленной крупнозернистой стали ЭП678 ( $\sigma_{0,2} = 700$  МПа,  $\sigma_B = 870$  МПа).

Таким образом, достижение повышенного уровня механических характеристик слоистых композитов, получаемых сваркой взрывом, возможно путем использования исходных заготовок с ультрамелкозернистой структурой или с развитой субструктурой, а также применения последующей холодной деформационной или термической обработки. Достижение высоких прочностных свойств слоистых композитов, получаемых пакетной прокаткой, осуществимо в диапазоне температур и степеней обжатий, обеспечивающих одновременное образование прочных соединений на границе раздела и диспергирование зеренной структуры слоев в процессе прокатки.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО  
РАН по теме № АААА-А18–118020790147–4.*

### **Литература**

1. Gladkovsky S. V., Kuteneva S. V., Sergeev S. N. Microstructure and mechanical properties of sandwich copper / Steel composites produced by explosive welding // Materials Characterization. 2019. V. 154. P. 294–303.